

한국형 경량 전철 주행시 동적 응답 처리의 설계 기준 비교 연구

A Comparison Study on the Design of Dynamic Response appears on Bridge as operation of Light Railway Train

연상호*, 강성원**

세명대학교*, 대우건설(주)**

Yeon sang-ho*, Kang sung-won**

Semyung University*, Daewoo construction**

요약

경량전철은 기존 지하철의 지선과 중소도시의 간선, 그리고 대도시 및 위성도시를 연결하는 교통수요 처리에 적합하다. 또한 기존 도로변이나 도로위에 지상이나 고가로 건설할 수 있고, 차량 회전반경, 등판능력, 가감속 및 차량운행 간격 등에서 성능이 뛰어나다. 게다가 접근성 향상, 소음 및 대기오염 감소, 무인운전등도 가능하여 건설운영 및 수송효율, 환경보전 측면에서 효율적인 교통수단이다. 따라서 이러한 지하철 위주의 도시철도 건설로 인한 문제점을 해결하기 위하여 당해지역의 교통수요 및 재정여건에 걸맞게 다양한 시스템의 선정 및 운영이 가능한 경량전철을 건설하도록 추진되고 있다. 본 연구에서는 교량응답 최대가속도와 변위, 변형률을 차량속도와 비교하여 분석하였다. 이를 위하여 PSC교량에서 안내레일에 발생할 수 있는 단차를 인위적으로 설정하여 차량주행실험을 수행하였다. PSC 교량은 지간길이 30m로서 두 개의 주형과 콘크리트 슬래브로 구성되었으며, 실험에 사용된 차량은 AGT 고무차륜이며 20km/h ~ 60km/h사이를 속도 20km/h 씩 증가시키면서 차량속도와 안내레일의 단차 유무에 따른 교량의 동적응답인 교량응답신호와 충격계수를 비교 분석하였다. 일반적으로 차량주행에 의한 교량의 동적응답 신호인 가속도, 변위, 변형률은 장기적으로 크게 발생하면 피로 손상과 더불어 사용성과 내구성에 악영향을 미친다. 가속도와 변위, 변형률에 대한 동적응답 제한 범위는 현재 경량전철 설계기준에 도입되어 있지 않으므로 본 연구에서 발생한 결과를 바탕으로 안내레일 유무에 따른 동적응답 차이를 확인하고 경량전철 주행시 교량에 발생하는 동적응답의 제한을 제시하고자 하였다.

Abstract

AGT system is a kind of light railway train. AGT system use of concrete track and rubber tire, so it can be reduce the noise and vibration, compare to the normal train system. And, the dynamic responses of normal bridge are influenced by the dynamic characteristics of bridge, the speed of vehicle and the surface roughness of railway. But the AGT system bridge is influenced not only the above facts but also the guiderail unevenness, because, AGT vehicle steered by guiderail. So, in this study, optimized service condition is suggested for the design and operation of AGT system, by the means of experimental study. The experiments are executed for PSC bridge with length of 30m, at the AGT test line in Kyongsan. The test results are compared and investigated according to the prominence. In the test result, the guiderail prominence influenced on the dynamic response of bridge. It shows a increase as compared with no guiderail prominence in the dynamic response value acceleration, displacement, stain.

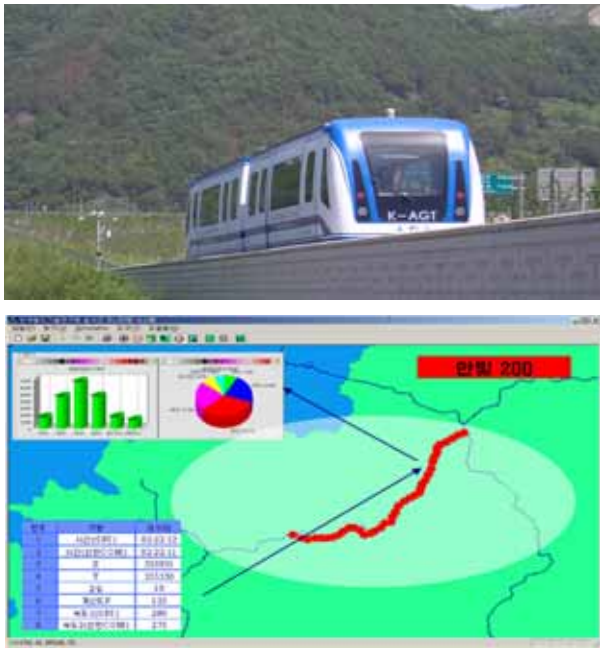
I. 서론

I. 연구배경

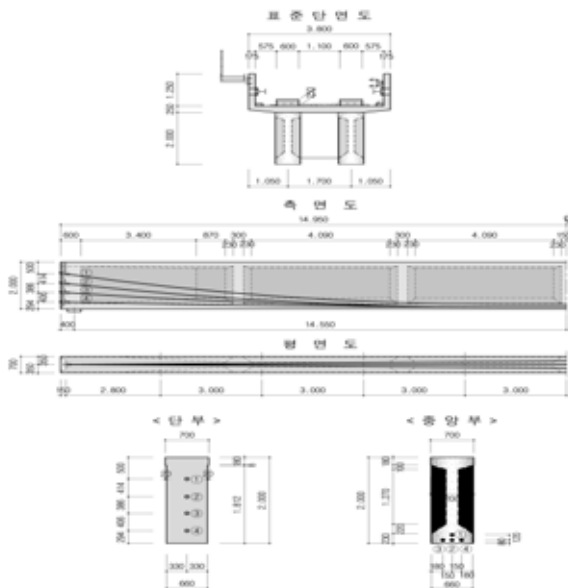
경량전철은 기존 지하철의 지선과 중소도시의 간선, 그리고 대도시 및 위성도시를 연결하는 교통수요 처리에 적합하다. 또한 기존 도로변이나 도로위에 지상이나 고가로 건설할 수 있고, 차량 회전반경, 등판능력, 가감속 및 차량운행 간격 등에서

성능이 뛰어나다. 게다가 접근성 향상, 소음 및 대기오염 감소, 무인운전등도 가능하여 건설운영 및 수송효율, 환경보전 측면에서 효율적인 교통수단이다. 따라서 이러한 지하철 위주의 도시철도 건설로 인한 문제점을 해결하기 위하여 당해지역의 교통수요 및 재정여건에 걸맞게 다양한 시스템의 선정 및 운영이 가능한 경량전철을 건설하도록 추진되고 있다. 이러한 신교통시스템이 정착되기 위해서는 여러 시스템에 대한 법·제도

적 장치뿐만 아니라 적용성에 있어서 어느 시스템이 효율적인지 꼼꼼히 따져보아야 하며 고무차륜 경량전철, 철재차륜 경량전철, 도시형 자기부상시스템, BRT차량, 모노레일 등은 도시의 특성 및 수요수요에 따라 적절히 고려될 때 투자 및 운영효율성을 확보할 수 가 있다. 국내에서 신 교통 시스템의 적용방안을 검토할 때 지금까지는 주로 차량위주로 고려되었으나 향후에는 인프라 시스템 전반에 대하여 세심하게 고려되어 향후 운영단계에서 발생할 수 있는 인터페이스상의 문제를 사전에 방지해야 할 것이다.



▶▶ 그림 1. 경전철 AGT 전경 (GIS 및 전자지도 기반 차량운행 현황표시)



▶▶ 그림 2. 시험선적용 PSC 교량 단면도

본 연구에서는 교량응답 최대가속도와 변위, 변형률을 차량속도와 비교하여 분석하였다. 일반적으로 차량주행에 의한 교량의 동적응답 신호인 가속도, 변위, 변형률은 장기적으로 크게 발생하면 피로 손상과 더불어 사용성과 내구성에 악영향을 미친다. 가속도와 변위, 변형률에 대한 동적응답 제한 범위는 현재 경량전철 설계기준에 도입되어 있지 않으므로 본 연구에서 발생한 결과를 바탕으로 안내레일 유무에 따른 동적응답 차이를 확인하고 경량전철 주행시 교량에 발생하는 동적응답의 제한을 제시하고자 하였다. (단, 본 실험에서는 변형률의 값이 미미 하므로 교량응답 가속도와 교량응답 변위를 사용하였다.

II. 연구내용

2.1 동적응답 가속도

안내레일에 단차가 발생하였을 경우와 그렇지 않은 경우 교량에서 발생하는 동적응답 가속도를 차량속도와 함께 비교하였다. 현재 경량전철에 사용되는 교량상부구조물의 진동가속도는 고속철도설계기준의 설계기준을 적용하여 0.5g 이하로 규정하고 있으며 궤도-구조물간 상호작용조건은 다음과 같이 기준을 제시하고 있다.

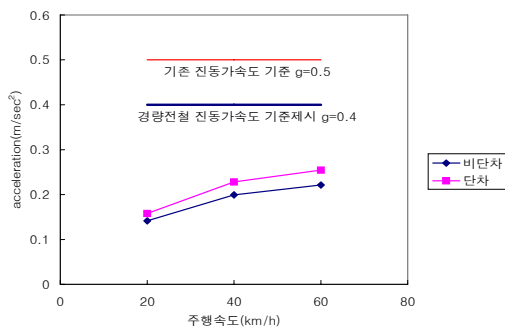
- (1) 교량 등 고속철도 선로 상부구조물이 두개의 교대에 걸쳐져 있는 단순구조 형식이거나, 또는 하나의 교대를 포함하는 상부구조를 가지거나, 혹은 레일신축이음장치(R.E.J)를 가지고 있거나 가지지 않는 복잡한 연속 구조물인 경우 등의 모든 경우에 있어서, 장대 레일에서 기인하는 교축방향 하중은 구조물과의 상호작용으로 복잡하게 분산되어진다. 이러한 하중들의 일부는 다른 선로에 전달되어지며, 또한 교량 구조물은 교량의 종방향 변위에 대한 궤도의 저항과 탄성받침 등 종방향 강성을 고려 할 수 있는 특정한 형식의 받침에 의한 종방향 변위에 대한 상부구조의 저항과 같은 영향을 받을 수 있으므로 세밀히 검토하여야 한다.
- (2) 궤도에 추가되는 하중들은 레일의 특성과 함께 고려되어야 한다.
- (3) 다음의 하중에 의한 영향은 복합적인 수평방향 거동을 유발하여 다음의 3가지를 반드시 고려하여야 하고 있다.
 - ① 온도팽창에 따른 레일과 구조물에서의 서로 다른 거동의 영향
 - ② 제동과 시동에 준용하는 수평하중의 영향
 - ③ 다음 사항을 유도할 수 있는 수직하중에 의한 교량 휨에 기인한 받침 위의 상부구조 단부 각 변위

이러한 차량주행과 안내레일 단차 유무에 따라서 발생하는 가속도, 변위, 변형률 등 교량의 동적응답을 측정하기 위한 실험변수는 각각 차량의 주행 속도와 안내레일의 단차이다. 속도는 20km/h, 40km/h, 60km/h 이며, 안내레일 단차의 크기는 10mm로 설정하였으며 각각의 모든 실험은 2회 반복 수행하였다.

2.2 교량 상부구조의 종 방향 변위

2.2.1 레일에서의 추가 힘 응력

본 연구에서는 단차가 있을 경우 및 없을 경우 모두 0.5g 이하의 응답가속도를 나타냄으로서 연구에 사용된 실험교량은 진동가속도 기준을 만족한다고 볼 수 있다. 그러나 경량전철과 고속철도는 도심지를 통과하는 기준과 속도를 고려하여 본다면 경량전철에 대한 진동가속도 기준은 더욱 작게 제시되어 진동소음저감 및 사용성과 내구성 향상을 도모하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 그림3은 안내레일에 단차가 있는 경우와 없는 경우 교량에서 발생한 최대진동가속도를 속도별로 비교하였다. 차량속도가 증가함에 따라서 진동가속도는 증가하며, 단차가 있는 경우가 없는 경우보다 더 큰 진동가속도를 나타낸다. 본 실험에서 발생한 최대 진동가속도는 고속철도의 기준인 0.5g에 크게 미치지 않음으로서 사용성과 내구성에 대한 안정성을 확보한 것으로 판단된다. 그러나 본 실험을 바탕으로 경량전철교량의 진동가속도 기준은 고속철도 기준의 80%수준인 0.4g로 제시를 하여 경량전철교량에 대한 진동가속도 기준을 제시한다.



▶▶ 그림 3. 경량전철노선 진동가속도기준제시

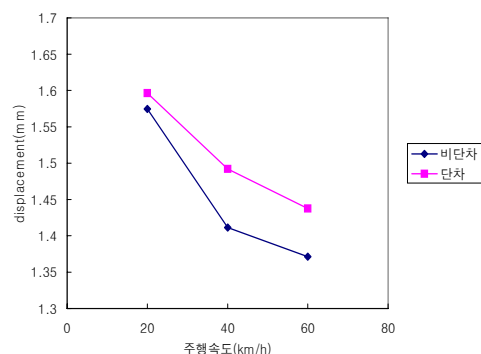
2.2.2 동적응답 변위

안내레일에 단차가 발생하였을 경우와 그렇지 않은 경우 교량에서 발생하는 동적응답 변위를 차량속도와 함께 비교하였다. 현재의 경량전철설계기준에서는 처짐의 허용값을 교량구조물의 휨 부재는 사용하중과 충격으로 인해 발생한 처짐 또는 변형이 구조물의 강도나 실제사용에 해로운 영향을 주지 않도록 충분한 강성을 갖도록 설계되어야 하는 것으로 정의하

고 있다. 한편 고무차륜 AGT의 선로구축물의 설계시 처짐에 관련된 기준은 신교통 시스템의 토목구조물설계지침(안)을 참조하여 다음과 같이 제안하며, 이 값은 향후 시험선로에서의 각종 실험결과에 근거하여 개정 및 보완되어야 할 것으로 판단된다. 고무차륜 AGT 하중(충격은 고려하지 않음)에 의한 주형의 처짐은 원칙적으로 Tab. 1의 값을 넘지 않는 것으로 한다. 이 경우, 복선구조물도 원칙적으로 단선제하 상태에서 검토하는 것으로 한다.

마련된 경량전철 설계기준의 처짐허용값에 의하면 본 연구에 사용된 PSC교량의 최대처짐은 3.75cm 이내로 규정된다. 그러나 본 실험에서는 차량의 주행에 따라 발생하는 교량응답 변위는 1.6mm 안팎의 작은 처짐을 발생하는 것으로 볼 때, 경량전철 설계기준의 정적처짐 기준과는 차이를 보인다. 이는 차량주행시 공차를 사용한 이유도 있지만 경량전철 설계기준안이 과도한 처짐허용기준을 제시하고 있으며, 아울러 본 연구에 사용된 PSC교는 경량전철 처짐 설계기준에 충분히 적합한 교량으로 판단된다. 이는 도심지를 통과하는 경량전철의 특성에 맞추어 보다 많은 연구와 실험을 통해서 사용성 및 내구성 향상을 위한 사용기준이 보완되어야 할 것이다.

Fig. 4은 안내레일 단차 유무에 따른 최대발생 변위의 차이를 차량주행 속도별로 비교하였다. 차량주행속도 20km/h에서는 안내레일 단차유무에 따라서 1.4%의 변위차이를 나타낸다. 40km/h에서는 5.7%, 60km/h에서는 4.8%의 변위차이를 나타낸다. 이는 저속과 고속보다는 중속(40km/h)에서 안내레일 단차에 의하여 보다 큰 교량응답 변위가 발생하는 것으로 사료되고 있다.



▶▶ 그림 4. 안내레일 단차 유무에 따른 변위차이

III. 안내레일 단차유무에 따른 동적증가 계수 비교

안내레일 단차 유무에 따라서 발생하는 변위응답의 변화량을 비교하기 위해서 동적증가계수(Dynamic Increment

Factor, D.I.F.)를 이용하여 비교하였다. 동적증가계수는 정적 변위에 대한 동적 변위 차 최대값 $\max(\text{동적 변위} - \text{정적 변위} / \text{최대 정적 변위}) + 1$ 으로 나타내었다. 표. 1은 실교량 실험에서 안내레일에 단차가 없는 경우와 단차가 있는 경우에 대하여 최대 변위 및 동적증가계수를 속도별로 나타낸 것이다. 안내레일에 단차가 없는 경우와 10mm 단차가 있는 경우 저속인 20km/h에서 1.434와 1.452의 가장 큰 동적증가계수를 나타낸다. 또한, 단차유무에 따른 동적증가계수의 증가량을 비교한 동적증가계수 증가량은 저속인 20km/h 주행시 101.3%의 증가를 보이는 반면 40km/h에서 107.9%의 동적계수 증가량을 나타낸다. 반면, 60km/h의 속도로 차량이 주행할 경우 동적증가계수 증가량은 103.6%로 다시 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 안내레일 단차에 의한 동적영향은 20km/h나 60km/h의 속도보다는 40km/h에서 더욱 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 차량속도의 증가에 비례하여 동적응답에 대한 영향이 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 차량주행속도와 안내레일 단차에 의한 교량의 동적응답영향의 관계를 통하여 최적의 주행조건을 제시하는 것이 가능하다.

변형률 응답은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

- 차량주행속도 변화와 안내레일 단차유무에 따라서 발생하는 교량변위응답에 대한 동적증가계수는 차량주행속도 20km/h에서 1.434와 1.452의 가장 큰 동적증가계수가 발생하였으며, 동적증가계수 증가량은 40km/h에서 107.9%로 가장 큰 증가를 나타냈으며, 20km/h와 60km/h에서는 각각 101.3%, 103.6% 증가를 나타내었다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] 철도설계기준, 대한토목학회. 2004
- [2] 도로교설계기준, 한국도로교통협회. 2005
- [3] 최동호, 최은수, 유동호, 이희업, “경량전철의 교량구조 및 레도 구조”, 한국강구조학회지, 18권, 3호, pp.27~39. 2006
- [4] 이희업, 오지택, 최일윤, “경량전철 고무차륜 AGT 시스템의 구조물 설계기준”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.516~521, 2003
- [5] 고속철도설계기준, 한국철도학회, 2003
- [6] 경량전철 종합시스템엔지니어링 기술개발 연구, 건설교통부, 1999~2005

[표 1] 처짐 허용값

상부구조형식	최대 처짐		비고
	단순형 및 연속형	게르버보의 캔틸레버부	
철근콘크리트 상판	L ≤ 10m	L/2,400	L/1,600
	10m < L ≤ 40m	L/(24,000/L)	L/(16,000/L)
	L > 40m	L/600	L/400
기타형식	L/600	L/400	

구분	단차가 없는 경우 최대변위 (mm)	동적증가 계수	단차가 있는 경우		동적증가 계수 증가량 (%)	
			최대 변위 (mm)	동적증가 계수		
정적실험	정적변위	1.095	-	1.095	-	
동적실험	20Km/h	1.57	1.434	1.59	1.452	101.3%
	40Km/h	1.4	1.279	1.51	1.379	107.9%
	60Km/h	1.39	1.269	1.44	1.315	103.6%

IV. 결론

현재 마련된 기존의 각 설계기준을 실험결과와 직접 비교함으로써 차량주행에 따른 최대 동적응답치의 기준제시에 대한 근거를 실험하였다.

- 본 연구의 실험결과분석과 시뮬레이션 해석을 통하여 경량전철 노반상의 교량구간에 경량전철 주행 시 안내레일에 발생된 단차는 교량의 동적 응답에 영향을 미친다. 또한 안내레일 단차유무에 상관없이 속도의 증가에 따라서 동적가속도 응답은 증가하는 반면, 동적변위 응답과 동적